

ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ В ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛА ДАВЛЕНИЕМ

В.А. Шилов, С.П. Куделин, Ю.В. Инарович, А.Р. Бондин, В.Д. Челнокова

ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
(г. Екатеринбург, Россия)

В Уральском федеральном университете разработана экспертная система (ЭС) для анализа и проектирования технологии сортовой прокатки, которая может быть использована при оптимизации действующих и проектировании новых технологических процессов сортовой прокатки. Для функционирования ЭС созданы базы знаний о предметной области, основанные на теоретических и экспериментальных исследованиях, а также обобщения опыта производства сортовых профилей на действующих станах. Комплексная математическая модель расчета калибровок валков и технологических режимов прокатки, созданная на основе современных представлений о механике деформируемого тела, позволяет рассчитывать полный комплекс технологических и энергосиловых параметров моделируемого процесса. Программное обеспечение ЭС разработано для операционной системы Windows с использованием среды визуального программирования Borland C++ Builder.

Ключевые слова: экспертная система, база знаний, база данных, наборы правил, сортовая прокатка, калибровка валков.

At the Ural Federal University ES developed for analysis and design technologies bar rolling, which can be used in the optimization of existing and design of new processes bar rolling. For the operation of the ES created a knowledge base about the subject area, based on theoretical and experimental studies, as well as generalizations of experience in the production of rolled bars at existing mills. A comprehensive mathematical model of calculation of rolling passes and technological rolling, created on the basis of modern ideas about the mechanics of deformable bodies, allows the calculation of a full range of technological and energy-power parameters of the simulated process. Software ES is developed for operational system Windows using the visual programming environment of Borland C++ Builder.

Keywords: Expert system, knowledge base, database, rule sets, bar rolling, rolling passes, mathematical modeling, optimization.

Решение задач автоматизированного проектирования технологических режимов прокатки возможно на основе применения методов искусственного интеллекта, одним из проявлений которого являются экспертные системы (ЭС), находящие все большее применение в различных предметных отраслях [1–4 и др.]. В Уральском федеральном университете разработана ЭС для анализа и проектирования технологии сортовой прокатки.

Разработанная нами ЭС технологии сортовой прокатки предназначена для оперативного анализа и экспертной оценки технологических процессов прокатки сортовых профилей на станах с непрерывным и последовательным расположением рабочих клетей. При этом она позволяет решать достаточно

широкий круг задач моделирования, диагностики и оптимизации действующих и проектируемых технологических процессов, а также определения параметров настройки прокатных станов при реализации рассчитанных технологических режимов.

В частности, специалисту-пользователю система предоставляет возможность:

- рассчитывать полный комплекс технологических параметров прокатки заданного профиля и проводить их экспертную оценку;
- определять влияние температуры нагрева заготовки на технологические параметры и нагруженность оборудования стана;
- моделировать влияние скоростного режима прокатки на изменение технологических параметров и условия работы прокатных клетей;
- определять влияние марки прокатываемой стали на заполнение калибров и параметры силовой загрузки оборудования;
- определять возможность прокатки заданной марки стали в условиях действующей калибровки валков прокатного стана;
- находить причины поломок оборудования рабочих клетей;
- прогнозировать точность прокатки заданного профиля на стане с заданной жесткостью рабочих клетей;
- выявлять резервы совершенствования технологии по различным показателям (повышение производительности, снижение расхода тепловой и электрической энергии, увеличение степени загрузки оборудования);
- проводить оптимизацию и рационализацию действующих и проектируемых технологических процессов по критериям: быстродействия и экономии материально-энергетических ресурсов;
- определять установочные межвалковые зазоры в рабочих клетях при прокатке заданного профиля по запроектированным технологическим режимам.

Для функционирования ЭС технологии сортовой прокатки были созданы базы знаний о предметной области, основанные на теоретических и экспериментальных исследованиях, а также обобщения опыта производства сортовых профилей на действующих станах.

Декларативные знания (характеристика прокатных станов, сортамент прокатываемых профилей, калибровки валков и режимы прокатки, требования к качеству и точности профилей и т.п.) представлены в виде пяти реляционных баз данных (БД).

Для представления процедурных (формализованных) знаний о технологических процессах сортовой прокатки допустимо использовать различные математические модели (классическую теорию прокатки и расчета крутящего момента [5], метод конечных элементов [5], генетический алгоритм расчета формоизменения [6] и др.). В ЭС мы применили математическую модель формоизменения и энергосиловых параметров, разработанную в УрФУ на основе использования вариационных принципов теории пластичности и статистического обобщения действующих калибровок валков [7].

Для обработки комплекса формализованных знаний в целях принятия решения применили продукционные модели.

Структурная схема ЭС технологии сортовой прокатки приведена на рис. 1. В ее состав входят 13 основных модулей.



Рис. 1. Структурная схема экспертной системы технологии сортовой прокатки

Функционирование системы начинается с формирования исходной информации в модуле 1. При этом необходимые для решения задачи параметры вызываются из соответствующих баз данных (БД) и записываются в специальные файлы-таблицы. В разработанную ЭС включены следующие БД:

- по составу прокатных станов, работающих на отечественных металлургических заводах, и сортаменту прокатываемых на них профилей (БД «Заводы, станы, сортамент»);
- по технической характеристике прокатных станов (БД «Техническая характеристика стана»);
- по калибровкам валков и режимам деформации при прокатке характерных профилей (БД «Калибровка валков»);
- по требованиям стандартов к точности прокатываемых профилей (БД «Требования к точности»);
- по коэффициентам для определения сопротивления деформации различных сталей и сплавов (БД «Сопротивление деформации»).

Если анализируемый прокатный стан и технологический режим в БД отсутствуют, то информация о технической характеристике этого стана, калибровке валков и технологических режимах прокатки предварительно вводится в соответствующие БД. Таким образом идет постепенное накопление информации в БД, что создает возможность для проектирования технологии прокатки новых профилей по аналогам.

Сформированная исходная информация подвергается диагностике на предмет выявления ошибок (см. модуль 2). Предусмотрено графическое изображение анализируемых или проектируемых калибров и задаваемых в них полос на экране монитора (модуль «Графическое отображение»).

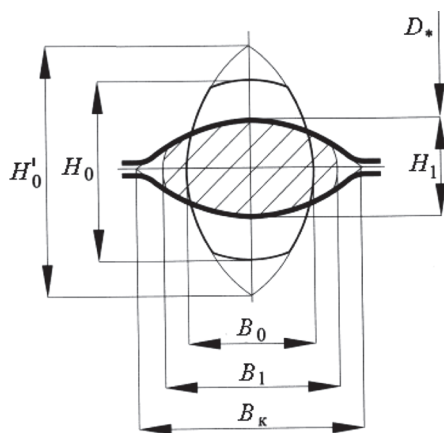
На основе сформированной исходной информации в блоке 4 производится расчет полного комплекса технологических и энергосиловых параметров моделируемого процесса.

Комплексная модель расчета калибровок валков и технологических режимов прокатки позволяет рассчитывать формоизменение металла и энергосиловые параметры для любой системы калибров простой формы в зависимости от следующих безразмерных параметров, однозначно характеризующих форму и размеры очага деформации при прокатке по любой системе калибров, например, по системе овал-овал (рис. 2): приведенный диаметр валков $A = D_*/H_1$; коэффициент обжатия $1/\eta = H_0/H_1$; отношение сторон задаваемого раската $a_0 = H_0/B_0$ и калибра $a_k = B_k/H_1$; степень заполнения предыдущего по ходу прокатки калибра $\delta_0 = H_0'/H_0'$; для ящичных калибров, кроме перечисленных параметров, – выпуск ящичного калибра $\text{tg } \phi$. Условия трения на контактной поверхности характеризуются показателем трения $\psi = \tau/\tau_s$, определяемым в зависимости от температуры металла и схемы прокатки (τ – напряжения трения, τ_s – предел текучести металла на сдвиг).

С учетом данных параметров рассчитывают следующие характеристики формоизменения металла:

– коэффициент уширения

$$\beta = 1 + C_0 \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)^{C_1} A^{C_2} a_0^{C_3} a_k^{C_4} \delta_0^{C_5} \psi^{C_6} \text{tg } \phi^{C_7} \left[1 + 0,6 \left(\frac{\sigma_{s_i}}{\sigma_{s_6}} - 1 \right)^{0,544} \right],$$



– ширину полосы $B_1 = B_0\beta$,
 – степень заполнения калибра $\delta_1 = B_1/B_k$,
 – площадь поперечного сечения раската $\omega_1 = H_1^2 f(\delta_1, a_k, \text{tg } \phi)$,
 – коэффициент вытяжки $\lambda = \omega_0/\omega_1$,
 где $C_0, C_1, C_2, \dots, C_7$ – коэффициенты, принимающие численные значения в зависимости от схемы прокатки, σ_{s_i} и σ_{s_6} – сопротивление деформации прокатываемой (σ_{s_i}) и

Рис. 2. Схема прокатки по системе калибров овал-овал

базовой низкоуглеродистой стали (Ст3), определяемое по методу термомеханических коэффициентов А.А. Третьякова – В.И. Зюзина, Л.В. Андреюка – Г.Г. Тюленева или каким-либо другим методом [8, 9].

Энергосиловые параметры рассчитывают по формулам:

– среднее контактное давление $p = 1,15 n_{\sigma} \sigma_s$,

– сила прокатки $P = pF$,

– крутящий момент деформации $M_{\text{вал}} = 0,287 \sigma_s H_1^3 A^2 n_{\text{вал}}$,

– мощность прокатки $N_{\text{пр}} = 2 M_{\text{вал}} H_1 U / A$,

где n_{σ} – коэффициент напряженного состояния, учитывающий влияние контактного трения и жестких концов; F – контактная площадь; $n_{\text{вал}}$ – коэффициент мощности прокатки; U – скорость прокатки. Коэффициенты n_{σ} , $n_{\text{вал}}$ и контактную площадь определяют в зависимости от схемы прокатки по формулам, имеющим общую структуру следующего функционального вида:

$$n_{\sigma} = f_1(l/H_{\text{ср}}, a_k, A, a_0, \psi); n_{\text{вал}} = f_2(\lambda, A, \psi); F = H_1^2 f_3(1/\eta, A, a_0, a_k, \delta_0).$$

Для схем прокатки, включающих калибры, форма которых отличается от обычной формы калибров простой формы, система расчетов предусматривает определение энергосиловых параметров, при этом фасонные калибры и раскат заменяются соответственными прямоугольными.

Скорости прокатки U_i в каждой i -й клетки непрерывного и последовательного стана рассчитываются с учетом условия постоянства секундных объемов: $U_i = U_{i-1} \cdot \lambda_i$. Одновременно рассчитываются минимально и максимально допустимые скорости прокатки U_{mini} и U_{maxi} в зависимости от предельной частоты вращения и катающего диаметра валков каждой клетки.

Для расчета температуры раската по проходам в системе предусмотрены две математические модели:

– с учетом потерь тепла за счет лучеиспускания и разогрева металла от деформации (две статьи теплового баланса);

– с учетом потерь тепла за счет лучеиспускания, конвекции, теплопроводности и разогрева металла от деформации (четыре статьи теплового баланса).

В результате расчетов формируются таблицы расчетных данных (модуль «Таблицы результатов»). Предусмотрена возможность представления расчетных параметров в виде графиков изменения их по проходам. С этой целью в состав системы включен модуль «Графики».

Полученная расчетная информация подвергается экспертной оценке с проверкой всех ограничений, рассчитываются критерии качества проектируемого процесса (блоки 7 и 8).

В ЭС предусмотрены следующие ограничения режимов прокатки в каждом i -м проходе:

– по степени заполнения калибров металлов

$$0,6 \leq \delta_{li} \leq 1,0 ;$$

– по условиям захвата металла валками

$$\alpha_i < [\alpha] ;$$

– по условиям устойчивости полос в калибрах

$$[a]_{\min} < a_{li} < [a]_{\max};$$

– по прочности оборудования рабочих клеток

$$R_i < P_{\text{доп}i}, M_{\text{пр}i} < M_{\text{доп}i};$$

– по степени загрузки электродвигателей привода клеток (с учетом его типа)

$$k_{\text{дв}i} = (M_i / M_{\text{дв}i}) < 1 \text{ или } N_{\text{пр}i} < N_{\text{дв}i};$$

– по скоростному режиму работы стана

$$U_{\min i} < U_i < U_{\max i};$$

– по производительности нагревательной печи

$$\Pi_j < \Pi_{\text{п}},$$

где R_i и $M_{\text{пр}i}$ – реакция силы прокатки на шейку валка и крутящий момент прокатки и их допустимые значения $P_{\text{доп}i}$ и $M_{\text{доп}i}$; $k_{\text{дв}i}$ – коэффициент загрузки электродвигателя привода клетки; M_i , $M_{\text{дв}i}$ – крутящий момент, приведенный к валу двигателя, и момент, развиваемый электродвигателем; $N_{\text{пр}i}$ и $N_{\text{дв}i}$ – мощность прокатки и мощность электродвигателя; α_i , $[\alpha]$ – расчетный и максимально допустимый угол захвата металла валками; α_i , $[\alpha]_{\min}$ и $[\alpha]_{\max}$ – расчетное, минимально и максимально допустимое по устойчивости отношение осей раскатов неравноосных поперечных сечений; Π_j и $\Pi_{\text{п}}$ – производительность стана при прокатке j -го профилеразмера и производительность нагревательной печи.

Для оценки качества и оптимизации анализируемых и проектируемых технологических процессов в системе предусмотрено использование следующих критериев:

- производительность прокатного стана, рассчитываемая в зависимости от такта $T_{\text{т}}$ или конечной скорости прокатки $U_{\text{к}}$;
- расход электроэнергии на прокатку $W_{\text{э}}$;
- расход топлива $W_{\text{т}}$, контролируемый по температуре нагрева металла t_0 ;
- степень заполнения калибров δ_j , влияющая на качество формоизменения металла;
- степень нагруженности оборудования рабочих клеток стана:

$$k_{\text{р}} = P_{\text{доп}} / R_{\text{max}}, k_{\text{м}} = M_{\text{доп}} / M_{\text{max}}, k = P_{\text{доп}} / R_{\text{max}}, k_{\text{дв}} = N_{\text{н}} / N_{\text{дв}}.$$

Результаты оценки системы ограничений приводятся к безразмерному виду и формируются в виде алфавита (таблица).

Производственные модели базы знаний (блок 9) содержат набор правил, обобщающих опыт специалистов-экспертов по улучшению качества технологических процессов. Знания хранятся с использованием таблиц целей, выводов, правил, условий и фактов (рис. 3).

В зависимости от решаемой задачи (поставленной цели) предусмотрено несколько наборов (таблиц) правил, представляющих собой цепочку логических рассуждений, основанных на применении продукций вида [2; 3] «ЕСЛИ... ТО» (условие Р действие). В указанной конструкции правил между условием и действием располагаются факты, в качестве которых используются полученные расчетные данные и их экспертные оценки (см. табл.).

Например:

«ЕСЛИ $\alpha/[\alpha] > 1,05$, ТО необходимо уменьшить коэффициент обжатия $1/\eta$ »;

«ЕСЛИ степень загрузки электродвигателя $k_{дв}$ равна или меньше 0,4, ТО рекомендуется увеличить коэффициент вытяжки λ »;

«ЕСЛИ $k_p > 1$, ТО возможна поломка оборудования клетки, необходимо перераспределить обжатия» и т.п.

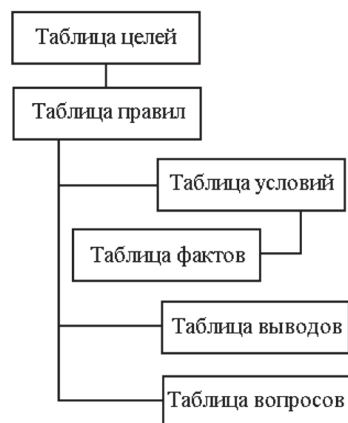


Рис. 3. Иерархия таблиц знаний

Экспертная оценка режима прокатки в каждой i -й клетки прокатного стана ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)

Параметр	Резерв		Корректировка		Большая перегрузка
	Значительный	Небольшой	Оптимальная	Небольшая	
	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3	Уровень 4	Уровень 5
$\alpha/[\alpha]$	0,3	0,8	1,0	1,05	1,10
U/U_{\max}	0,5	0,8	0,95	1,10	1,20
$\alpha_1/[\alpha]_{\max}$	0,5	0,8	1,0	1,05	1,15
k_p	0,4	0,7	1,0	1,1	1,15
k_m	0,4	0,7	1,0	1,1	1,15
$k_{дв}$	0,4	0,7	1,0	1,1	1,15

Наряду с этим используются правила типа AUBUA&B и преобразования Де Моргана [3].

Применяя соответствующий набор правил последовательно для каждого прохода, система определяет резервы улучшения технологического процесса и формирует в блоке 10 (Машине вывода) решение по изменению режима деформации металла, выдавая его в виде сообщения на экран монитора. Пользователю предоставляется возможность согласиться с этим решением или внести в него коррективы, изменить соответствующим образом исходные данные и произвести повторные расчеты. Путем такого диалога с компьютером пользователь добивается получения оптимального решения поставленной задачи. Параметры рассчитанного технологического процесса заносят в БД в целях накопления информации.

Программное обеспечение описанной ЭС разработано для операционной системы Windows с использованием среды визуального программирования Borland C++ Builder [10], БД основаны на использовании таблиц Paradox.

Указанные программные и технические средства обеспечивают достаточно простой и удобный интерфейс пользователя с компьютером посредством раскрывающихся на экране монитора окон, меню, списков, полей ввода, кнопок и т.п.

Программный комплекс «Экспертная система технологии сортовой прокатки» зарегистрирован в РОСПАТЕНТе [11].

Вывод

Разработана ЭС технологии сортовой прокатки, которая может быть использована в НИИ и на металлургических заводах при совершенствовании действующих и проектировании новых технологических процессов сортовой прокатки.

Список использованных источников

1. Джексон П. Введение в экспертные системы: Учеб. пособие / П. Джексон. – М.: Вильямс, 2001. – 624 с.
2. Егоров Н.В. Диагностические информационно-экспертные системы / Н.В. Егоров, А.Г. Карпов. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2002. – 470 с.
3. Ручкин В.Н., Фулин В.А. Универсальный искусственный интеллект и экспертные системы / В.Н. Ручкин, В.А. Фулин. – СПб.: BHV-Санкт-Петербург, 2009. – 240 с.
4. Джексон П. Введение в экспертные системы. 3-е изд. / П. Джексон. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 411 с.
5. Oduguwa V., Roy R. A Review of Rolling System Design Optimisation // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006, июнь V. 46, I.7-8, P. 912–928 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/1826/1023/4/Review_Rolling_System_Design_Optimisation_2006.pdf
6. Huang B., Xing K., Abhary K., Spuzic S. Optimization of oval-round pass design using genetic algorithm // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2012, август V. 28, I. 4, P. 493–499 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.researchgate.net/publication/257242312_Optimization_of_ovalround_pass_design_using_genetic_algorithm
7. Смирнов В.К. Калибровка прокатных валков / В.К. Смирнов, В.А. Шилов, Ю.В. Инамович. – М.: Теплотехник, 2010. – 490 с.
8. Зюзин В.И., Третьяков А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением: Справочник. – Челябинск: Металл, 2000. – 368 с.
9. Никитин Г.С. Теория непрерывной продольной прокатки / Г.С. Никитин. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 399 с.
10. Шилдт Г. Теория и практика C++ / Г. Шилдт. – СПб.: BHV-Санкт-Петербург, 2001. – 412 с.
11. Программный комплекс «Экспертная система технологии сортовой прокатки» / С.П. Куделин, В.К. Смирнов, В.А. Шилов, Ю.В. Инамович // Св. № 2001610602 от 25 мая 2001 г.